

УДК 519.711.3:621.793:631.3.022

В. И. Черноиванов

ГОСНИТИ, г. Москва

С. М. Шанчуров

Региональный центр лазерных технологий, г. Екатеринбург

А. В. Ишков, Н. Т. Кривочуров, В. В. Иванайский

Алтайский государственный аграрный университет, г. Барнаул

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ БОРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ

Проведены экспериментальные исследования процессов получения боридных покрытий состава Fe-B-Fe_nB при индукционном нагреве образцов из стали 65Г. Покрытия предназначены для повышения износостойкости рабочих органов сельхозмашин. Покрытия были получены из обмазок на основе порошковых смесей, содержащих B₄C (5-20 мас. %) и плавный флюс для индукционной наплавки П-0,66.

Ключевые слова: боридные упрочняющие покрытия, индукционный нагрев, математическое моделирование.

V. I. Chernoiivanov, S. M. Shanchurov, A.V. Ishkov, N. T. Krivochurov, V.V. Ivanaisky

MATHEMATICAL MODEL OF BORIDE COATS OBTAINING PROCESS AT INDUCTION HEATING

Experimental studies of obtaining processes of boride coats of Fe-B-Fe_nB composition are conducted at induction heating of samples from 65Mn steel. Coats intend for increase of wear resistance of working bodies of agricultural machines. Coats were received from a plastering on the basis of the powder mixes containing B₄C (5-20 mas. %) and P-0,66 fused flux for a deposition.

Keywords: boride hardening coats, induction heating, mathematical modeling.

Продление срока службы, повышение надежности и восстановление деталей и узлов машин путем их упрочнения, нанесения различных износостойких покрытий является актуальной задачей современного машиностроения [1]. Это относится и к таким быстроизнашивающимся деталям, как рабочие органы (РО) сельхозмашин [2; 3]. В настоящее время в

машиностроении наибольшее распространение получило упрочнение РО путём индукционной наплавки различных твёрдых сплавов [4; 5], а также химико-термической обработкой [6].

Ранее авторами был разработан новый способ упрочнения РО при скоростном ТВЧ-борировании, который позволяет получать на поверхности стальной детали слой композиционных упрочняющих боридных покрытий тройной системы $\text{Fe}_n\text{B-Fe-B}$, толщиной 350–600 мкм за время 1–2 мин [7; 8], однако, сложный характер физико-химических процессов при формировании покрытий, подплавление основной детали и окисление [9], усложняют техническую и технологическую реализацию этого способа.

Целью настоящей работы являлась разработка математической модели процесса получения боридных покрытий на стали 65Г при ТВЧ-нагреве.

Композиционные упрочняющие покрытия тройной системы $\text{Fe-B-Fe}_n\text{B}$ получали на образцах размером 20×50×5 мм, изготовленных из проката стали 65Г по ГОСТ 14959–79 при ТВЧ-нагреве, по методике, описанной в [4]. Температуру и скорость ТВЧ-нагрева контролировали ХА-термопарой. Толщину покрытий определяли металлографическим методом по ГОСТ 9.302–88. Износостойкость покрытий определяли по ГОСТ 23.208–79. В качестве эталона использовали образец из закалённой стали 65Г с твёрдостью 56–58 HRC_э без покрытия.

Значимость коэффициентов регрессии математической модели определяли по t -критерию Стьюдента, а адекватность модели - с помощью F -критерия Фишера [10].

Так как основная масса современных РО отечественных и зарубежных сельхозмашин выполнены из марганцовистых, хромистых и хромо-марганцовистых конструкционных легированных сталей 65Г, 45Х, 50ХГА и их аналогов [11], для оптимизации процесса получения таких покрытий была выбрана сталь 65Г.

Математическое моделирование проводилось в два этапа. Сначала была проведена оптимизация процесса получения изолированных упрочняющих

композиционных боридных покрытий тройной системы Fe-B-Fe_nB на стали 65Г по усеченному ортогональному плану ПФЭ типа 3² [9], когда в качестве основных влияющих факторов рассматривались: температура ТВЧ-нагрева, время борирования и скорость нагрева, в качестве целевых функций - относительная износостойкость и толщина боридного покрытия. После отыскания оптимальных значений температуры, времени и скорости ТВЧ-нагрева процесс оптимизировался по насыщенному ортогональному плану ПФЭ 2³ [10], когда в качестве основных влияющих факторов рассматривались содержание флюса П-0,66 в борирующем составе и время выдержки образца при оптимальной температуре борирования, а в качестве целевой функции - толщина боридного покрытия.

Первый этап. Для борированных образцов стали 65Г были построены экспериментальные уравнения регрессии, связывающие основные параметры процесса скоростного ТВЧ-борирования с целевыми функциями - толщиной h и относительной износостойкостью ε получающихся покрытий. В результате проведения ПФЭ плана 3², статистической обработки и перехода к декодированным факторам, нами была получена математическая модель для целевой функции относительной износостойкости получаемого композиционного упрочняющего боридного покрытия ε в зависимости от основных параметров - температуры нагрева T , °С, времени борирования t , с и скорости ТВЧ-нагрева V , °С/с в виде следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 537,938 - 0,557 \cdot x_1 - 10,569 \cdot x_2 - 17,487 \cdot x_3 + 0,011 \cdot x_1 \cdot x_2 + \\ & + 0,018 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,339 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,0003 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} h = & 1206,143 - 0,376 \cdot x_1 - 37,633 \cdot x_2 - 18,071 \cdot x_3 + 0,010 \cdot x_1 \cdot x_2 - \\ & - 0,012 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,517 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,001 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3. \end{aligned} \quad (2)$$

где: x_1 – температура нагрева, °С; x_2 – время выдержки при заданной температуре, с; x_3 – скорость нагрева, °С/с.

Относительную силу влияния отдельных факторов в модели определяли по принципу Парето [12], представляя их в виде диаграммы. Анализ показал,

что наиболее сильное влияние на относительную износостойкость боридного покрытия, оказывают скорость нагрева и время выдержки при заданной температуре, заметное влияние оказывают температура нагрева и тройное взаимодействие факторов, эффект от двойного взаимодействия факторов выражен слабо.

Анализ адекватности модели (система уравнений 1, 2) по корреляции между наблюдаемыми (экспериментальными) и предсказанными значениями износостойкости представлен на рис. 1.

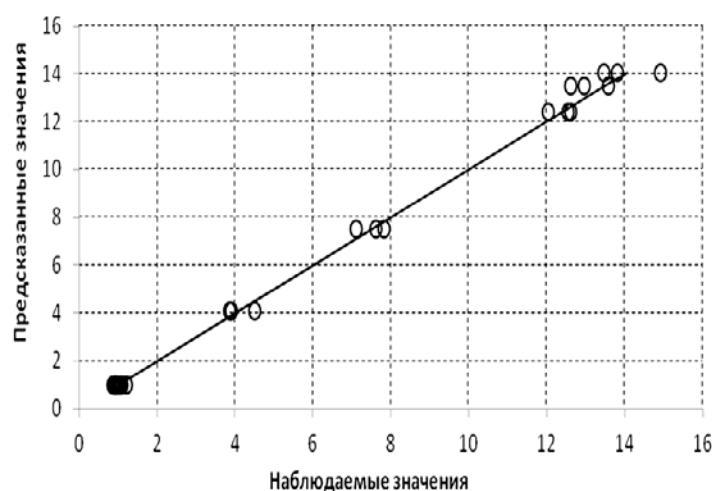


Рис. 1. Корреляция между расчетными и экспериментальными значениями относительной износостойкости боридного покрытия ε

Второй этап. Здесь в качестве факторов планирования нами были выбраны содержание флюса П-0,66 в борирующей смеси и время выдержки заготовки при заданной (оптимальной) температуре t , а в качестве целевой функции - толщина боридного покрытия h . Содержание основного борирующего агента B_4C может не учитываться, так как его количество может быть легко отрегулировано за счёт изменения толщины обмазки. Оптимальная температура борирования, рассчитанная с использованием системы уравнений 1, 2 и подтвержденная нами экспериментально, составила 1100–1250 °С. В результате проведения ПФЭ плана 2^3 и статистической обработки была разработана математическая модель толщины боридного покрытия в зависимости от параметров - содержание флюса П-0,66 в борирующем составе (x_1) и времени выдержки при заданной температуре t (x_2):

$$h = 450 - 17,1 \cdot x_1 - 178,3 \cdot x_2 - 88,25 \cdot x_1 \cdot x_2 - 203,000 \cdot x_1^2 - 26,5 \cdot x_2^2 + 179,25 \cdot x_1^2 \cdot x_2 - 120,25 \cdot x_1 \cdot x_2^2 + 224,25 \cdot x_1^2 \cdot x_2^2. \quad (3)$$

Анализ относительной силы влияния факторов по принципу Парето [12] показал, что все они входят в целевую функцию толщины боридного покрытия, однако наименьшее влияние на h оказывает содержание флюса П-0,66 в составе порошковой смеси для борирования (рис. 2). Как следует из рис. 2, в окрестности точки пинча найденной нами поверхности отклика, при содержании флюса П-0,66 в борирующем составе от 11 до 16 % мас. время выдержки при оптимальной температуре ТВЧ-нагрева (1100–1250 °С) в диапазоне от 70 до 125 с, не оказывает особого влияния на толщину покрытия, увеличение же содержания флюса свыше 16 % мас. приводит к резкому снижению толщины боридного покрытия.

С точки зрения технологичности процесса скоростного ТВЧ-борирования, диапазон исследуемых параметров при котором получается боридное покрытие толщиной от 300 до 400 мкм составляет: для количества флюса П-0,66 в составе борирующей смеси - от 11 до 16 мас. %, для времени выдержки – от 70 до 125 секунд.

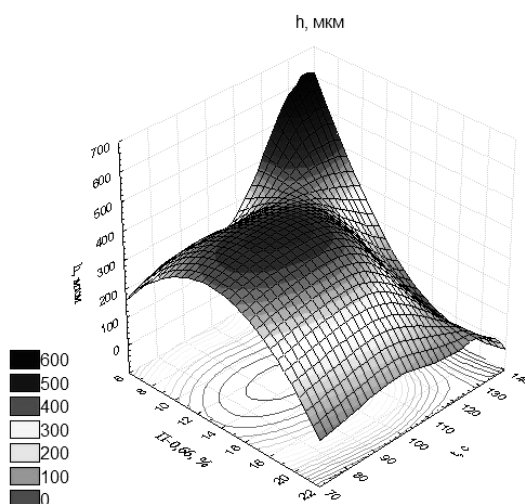


Рис. 2. Поверхность отклика целевой функции толщины покрытия на поле факторов содержания флюса П-0,66 и времени выдержки образца при оптимальной температуре ТВЧ-нагрева

Выводы:

1. Разработана математическая модель зависимости износостойкости и толщины боридного покрытия на стали 65Г, от величины параметров процесса (температура нагрева T , °С, время процесса борирования t , с и скорость нагрева V , °С/с) в технологически обоснованных интервалах их изменения, с вероятностью 0,95 и доверительным интервалом $\pm 5\%$.

2. Устаовлено, что при оптимальной температуре 1100–1250 °С изменение содержания флюса от 10 до 14 мас. % и времени ТВЧ-нагрева от 90 до 120 с, приводит к получению на стали 65Г композиционного упрочняющего боридного покрытия с толщиной до 300 мкм.

Список литературы

1. Методы упрочнения поверхностей деталей машин: сборник научн. статей / под ред. Г. И. Москвитина. – М. : Красанд, 2008. – 400 с.
2. Михальченков А. М., Феськов С. А. Износы культиваторных лап посевного комплекса «Моррис» // Достижения науки и техники АПК. – 2013. – № 10. – С. 55–58.
3. Черноиванов В. И., Горячев С. А. Основные подходы к ремонту и повышению уровня сервиса сельскохозяйственной техники // Техника и оборудование для села. – 2012. – № 12. – С. 2–4.
4. Индукционная наплавка твёрдых сплавов / В. Н. Ткачёв [и др.]. – М. : Машиностроение, 1970. – 183 с.
5. Повышение износостойкости функциональных поверхностей рабочих органов механизмов измельчения и перемешивания биогазовой установки / М. Г. Курбанова [и др.] // Достижения науки и техники АПК. – 2013. – №5. – С. 79–80.
6. Химико-термическая обработка металлов и сплавов : справочник / Г. В. Борисенок [и др.]; под ред. Л. С. Ляховича. – М. : Металлургия, 1981. – 424 с.
7. Мишустин Н. М., Иванайский В. В., Ишков А. В. Состав, структура и свойства износостойких боридных покрытий, полученных на сталях 658Г и 50ХГА при скоростном ТВЧ-борировании // Известия ТПУ. – 2012. – Т. 320. – № 2. – С. 68–72.
8. Получение износостойких композиционных боридных покрытий на стали 65Г при ТВЧ-нагреве / В. Ф. Аулов [и др.] // Труды ГОСНИТИ. – 2014. – Т. 115. – С. 139–145.
9. Термодинамическое обоснование химических реакций в системе В4С-боратный флюс-Fe при ТВЧ-нагреве / А. В. Ишков [и др.] // Известия Алтайского государственного университета. – 2014. – № 3-1 (83) . – С. 199–203.

10. Современный эксперимент: подготовка, проведение, анализ результатов: учебник / В. Г. Блохин [и др.] – М. : Радио и связь, 1997. – 232 с.
11. Флик Э. П. Развитие деталей и узлов сельхозмашин в России // Тракторы и сельхозмашины. – 2008. – № 12. – С. 12–14.
12. Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика ; под ред. С.А. Айвазяна. – М. : Финансы и статистика, 1985. – 487 с.